

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 561 657**

51 Int. Cl.:

H01L 31/09 (2006.01)

H01L 31/0352 (2006.01)

H01L 31/0232 (2014.01)

G01N 22/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.09.2010 E 10762711 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.11.2015 EP 2476143**

54 Título: **Fotomezclador para la generación de radiación de terahercios**

30 Prioridad:

09.09.2009 FR 0904298

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

29.02.2016

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (100.0%)
3, rue Michel-Ange
75016 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**PEYTAUIT, EMILIEN y
LAMPIN, JEAN-FRANÇOIS**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 561 657 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Fotomezclador para la generación de radiación de terahercios

La invención recae sobre un fotomezclador y sobre una fuente de radiación de terahercios basada en tal fotomezclador.

5 Se indica mediante la expresión "radiación de terahercios", la radiación electromagnética de frecuencia comprendida entre 100 GHz y 10 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) aproximadamente, lo cual corresponde a longitudes de onda comprendidas entre 3 mm y 30 μm aproximadamente. Situado entre el dominio óptico y el de las microondas, durante mucho tiempo este margen espectral ha sido infrutilizado, debido especialmente a la ausencia de fuentes y detectores adaptados.

10 A día de hoy, el aprovechamiento de la radiación de terahercios está en auge en la esfera industrial y comercial. Constituye su principal aplicación la espectroscopia de terahercios. Así es como han hecho aparición en el mercado los primeros sistemas comerciales de espectroscopia de terahercios de banda ancha. Entre las firmas pioneras en este campo, cabe citar Picometrix (Estados Unidos), Teraview (Reino Unido) en colaboración con Brucker Optics, Nikon (Japón), Kwele (Francia), Gigaoptics (Alemania), Tray-science (Canadá), Eskpla (Lituania). Algunas de estas
15 empresas también comercializan antenas de generación y detección de impulsos de terahercios: Eskpla, Gigaoptics o también Tray-science.

Estos sistemas de espectroscopia utilizan todos ellos una técnica llamada "bomba sonda" que se funda en un láser de pulsos de femtosegundo que permite llevar a cabo una medida en una banda espectral ancha pero con una escasa resolución ($> 1 \text{ GHz}$). Esta técnica permite generar y detectar impulsos electromagnéticos que tienen una
20 duración del orden del picosegundo y que, por lo tanto, comprenden componentes espectrales de hasta algunos THz.

Otra técnica de generación de radiación THz, muy prometedora para las aplicaciones espectroscópicas, es el fotomezclado, es decir, el mezclado de dos láseres infrarrojos sobre un fotodetector ultrarrápido.

25 Los dos haces láser superpuestos, de frecuencias f_1 y f_2 , originan un batido a frecuencia $f = |f_1 - f_2|$, seleccionada dentro del dominio de los terahercios ($100 \text{ GHz} \leq f \leq 10 \text{ THz}$). La fotocorriente generada por el fotodetector comprende un término constante y un término oscilante de frecuencia f : $I = I_0(1 + \cos(2\pi f t))$. El fotodetector está acoplado a una antena, que emite una radiación electromagnética de frecuencia f . El conjunto constituido por el fotodetector y la antena se indica con el término "fotomezclador".

30 Esta técnica fue descrita por primera vez en el artículo de E. R. Brown, K. A. McIntosh, K. B. Nichols y C. L. Dennis "Photomixing up to 3.8 THz in low-temperature-grown GaAs", Appl. Phys. Lett. 66, 285 (1995). Tiene la ventaja de presentar una mejor resolución espectral ($< 1 \text{ GHz}$) y de ser potencialmente portátil, por ser utilizable con diodos láser de semiconductor entre 700 y 1600 nm (0,7 - 1,6 μm), según el fotodetector utilizado.

Los fotodetectores que normalmente se utilizan para generar radiación de terahercios por fotomezclado son principalmente:

- 35 - a $\lambda = 0,7 - 0,8 \mu\text{m}$: fotorresistencias que utilizan un material de corto tiempo de vida tal como el arseniuro de galio crecido epitaxialmente a baja temperatura (GaAs BT),
- a $\lambda = 1,55 - 1,6 \mu\text{m}$: fotodiodos de transporte unipolar (fotodiodos UTC) o fotorresistencias que utilizan un material de corto tiempo de vida tal como el InGaAs irradiado,
- 40 - a $\lambda = 0,8 - 1,06 \mu\text{m}$, longitud de onda a la que funcionan amplificadores de fibras dopadas con iterbio, fotorresistencias de $\text{GaSb}_x\text{As}_{1-x}$ BT (con $0 < x < 1$, permitiendo el valor de x modificar la banda de absorción del material).

Las prestaciones obtenidas en generación son, en general, del orden de 1 μW a 1 THz para una potencia óptica del orden de 50 a 100 mW, ya sea a 0,8 μm o a 1,55 μm . Los mejores resultados a 1 THz (2,6 μW a 1,05 THz en 2003) se obtuvieron a 1,55 μm con un diodo UTC acoplado a una antena log-periódica: véase el artículo de Ito, H.; Nakajima, F.; Furuta, T.; Yoshino, K.; Hirota, Y.; Ishibashi, T., "Photonic Terahertz-wave generation using antenna-integrated" Electronics Letters, vol. 39, no. 25, pp. 1828-1829, 11 de diciembre de 2003.

Los fotodetectores de GaAs BT presentan generalmente una estructura planar constituida por electrodos metálicos interdigitados depositados sobre una capa epitaxial de GaAs BT (véase la figura 1). Un fotodetector típico se compone de 5 electrodos metálicos de 0,4 μm de ancho y de 10 μm de largo separados 1,8 μm . La superficie total del fotodetector es de 88 μm^2 .

Las potencias emitidas por los fotomezcladores, del orden de 1 μW a 1 THz, todavía son en mucho insuficientes para las aplicaciones de tipo espectroscopia. En efecto, los únicos detectores de banda ancha suficientemente sensibles para detectar este nivel de potencia con una buena relación señal a ruido (> 1000) son los detectores

bolométricos que funcionan a 4 K. Un aumento de la potencia generada permitiría utilizar detectores a temperatura ambiente.

La potencia THz emitida por los fotodetectores existentes viene limitada por efectos térmicos, tal como demostraron S. Verghese, K. A. McIntosh y E. R. Brown en el artículo "Optical and Terahertz power limits in the low-temperature-grown GaAs photomixers", Appl. Phys. Lett. 71, 2743 (1997). Para una tensión de polarización dada, cuando se incrementa progresivamente la potencia óptica, la destrucción de los fotodetectores tiene lugar antes de que aparezcan fenómenos de saturación, ya sea en corriente continua o en potencia THz.

Podría parecer evidente incrementar la superficie de los fotodetectores para poder eludir estos límites de potencia. Sin embargo, si las dimensiones transversales del fotodetector no son pequeñas con relación a la longitud de onda de la radiación de terahercios, las contribuciones de los diferentes elementos superficiales del detector pueden interferir de manera destructiva. Para evitar este efecto, se ha recurrido a estructuras planares llamadas "distribuidas", en las que el fotodetector va integrado en una guíaondas THz. Véase por ejemplo:

- E. A. Michael, B. Vowinkel, R. Schieder, M. Mikulics, M. Marso y P. Kordos "Large-area travelling-wave photonic mixers for increased continuous Terahertz power", Appl. Phys. Lett. 86, 111120 (2005); y

- M. Mikulics, E. A. Michael, R. Schieder, J. Stutzki, R. Gusten, M. Marso, A. van der Hart, H. P. Bochém, H. Luth y P. Kordos, "Travelling-wave photomixer with recessed interdigitated contacts on low-temperature-grown GaAs" Appl. Phys. Lett. 88, 041118 (2006).

Desgraciadamente, la complejidad de estas estructuras no permite aprovechar todo su potencial. La potencia máxima generada a 1 THz es del orden de 1 μ W, es decir, sensiblemente la misma que para un fotodetector "puntual", pero con un rendimiento menor.

La invención pretende superar las citadas limitaciones de la técnica anterior, especialmente en cuanto a potencia máxima generada.

De conformidad con la invención, tal propósito se alcanza mediante un fotomezclador para la generación de radiación de terahercios que incluye un fotodetector acoplado a una antena para radiación de terahercios, caracterizado por que dicho fotodetector incluye una capa de material fotoconductor susceptible de absorber una radiación óptica, presentando dicha capa un espesor inferior a la longitud de absorción de esta radiación por parte del material fotoconductor y estando comprendida entre un electrodo, llamado superior, al menos parcialmente transparente, y un electrodo, llamado inferior, reflectante, conformando dichos electrodos inferior y superior una cavidad resonante para dicha radiación óptica. Además de su función óptica, los electrodos sirven para polarizar el detector aplicando un voltaje a la estructura. Tal fotomezclador presenta propiedades térmicas mejores que las de los dispositivos de la técnica anterior, por lo que pueden funcionar en niveles de potencia más elevados.

El documento US 5.455.421 describe un detector infrarrojo que presenta una estructura semejante a la del detector utilizado en el fotomezclador de la invención. En ese documento, se preconiza la utilización de una capa activa delgada, inserta en una cavidad resonante, para incrementar la sensibilidad del detector y reducir su nivel de ruido. Son éstas consideraciones sin relación con una utilización en calidad de fotomezclador de terahercios.

Formas particulares de realización del fotomezclador de la invención son objeto de las reivindicaciones dependientes.

Es otro objeto de la invención una fuente de radiación de terahercios que incluye tal fotomezclador y al menos una fuente de radiación láser establecida para dirigir al electrodo superior del fotodetector dos haces (F_1 , F_2) de radiación láser superpuestos, presentando dichos haces de radiación láser una diferencia de frecuencia comprendida entre 100 GHz y 10 THz.

Es otro objeto más de la invención la utilización de un fotomezclador tal y como se ha descrito anteriormente para la generación de radiación de terahercios por fotomezclado.

La invención permite la generación de radiación de terahercios con una potencia del orden de 1 mW a unos milivatios, esto es, un aumento de tres órdenes de magnitud con respecto a la técnica anterior.

Otras características, detalles y ventajas de la invención se desprenderán con la lectura de la descripción que se lleva a cabo con referencia a los dibujos adjuntos, los cuales, dados a título de ejemplo, representan respectivamente:

La figura 1, una imagen obtenida con microscopio electrónico de barrido de un fotodetector ultrarrápido de la técnica anterior;

la figura 2, una representación esquemática, en sección, del fotodetector de la figura 1;

la figura 3, una representación esquemática, en sección, de un fotodetector según una forma de realización de la

invención;

la figura 4, un gráfico que muestra la dependencia del rendimiento óptico del fotodetector de la figura 3 en función del espesor de su capa de material fotoconductor;

5 la figura 5, un gráfico de la resistencia térmica del fotodetector de la figura 3 en función del espesor de su capa de material fotoconductor;

la figura 6, una representación esquemática, en sección, de un dispositivo de medida del coeficiente de respuesta de un fotodetector del tipo de la figura 3;

la figura 7, unos valores del coeficiente de respuesta de un fotodetector del tipo de la figura 3 medidos experimentalmente con el concurso del dispositivo de la figura 6;

10 la figura 8, un gráfico que muestra los valores de la fotocorriente de un fotodetector según una forma de realización de la invención en función de la tensión de polarización para diferentes potencias ópticas;

la figura 9, una representación esquemática, en sección, de un fotodetector según una forma de realización de la invención, destinada a ilustrar su modelización eléctrica;

15 la figura 10, un esquema que ilustra el método de las matrices de transferencia, utilizado para la modelización óptica de un fotodetector según una forma de realización de la invención;

la figura 11, una representación esquemática, en sección, de un fotodetector según una forma de realización de la invención, destinada a ilustrar su modelización térmica;

la figura 12, una representación esquemática, en sección, de un fotodetector según una forma de realización alternativa de la invención;

20 la figura 13, una representación esquemática, en sección, de un fotomezclador según una forma de realización de la invención; y

la figura 14, una representación esquemática de una fuente de radiación de terahercios según una forma de realización de la invención.

25 La figura 1 muestra una imagen, obtenida con microscopio electrónico de barrido, de un fotodetector ultrarrápido conocido por la técnica anterior, que incluye:

- una capa epitaxial CE de GaAs BT depositada sobre un sustrato SS de GaAs semiaislante; y
- cinco electrodos metálicos interdigitados EL, depositados sobre dicha capa CE, que presentan una anchura de 0,4 μm y una longitud de 10 μm, separados 1,8 μm en orden a definir una superficie activa de 88 μm².

30 En primera aproximación, la potencia generada a una frecuencia f en el margen THz por un fotomezclador basado en el detector de la figura 1 viene dada por:

$$P_{THz} = \frac{1}{2} \frac{R_A I_0^2}{(1 + (\omega R_A C)^2)(1 + \omega^2 \tau^2)}$$

donde:

- I₀ es la fotocorriente continua;
- R_A es la resistencia de radiación, que depende de la antena acoplada al fotodetector;
- 35 - C es la capacidad de los electrodos;
- τ es el tiempo de vida de los portadores fotogenerados; y
- ω = 2πf.

Esta ecuación muestra que la anchura de banda del fotodetector está regida por dos tiempos característicos:

- τ, tiempo de vida de los portadores, característico del material fotoconductor; y
- 40 - R_AC, constante de tiempo eléctrica.

Estas constantes de tiempo van asociadas a dos frecuencias de corte, f_{c1} = 1/(2πτ) y f_{c2} = 1/(2πR_AC).

La ganancia del fotodetector viene dada por $R_A I_0^2$.

Se puede definir un coeficiente de respuesta intrínseca del fotodetector $\mathfrak{R}(V)$ tal como:

$$I_0 = \mathfrak{R}(V) \times \eta_{opt} \times P_0 = \mathfrak{R}(V) \times P_{abs}$$

5 $\mathfrak{R}(V)$ crece con la tensión de polarización V hasta \mathfrak{R}_m para una tensión V_m que permite alcanzar la velocidad de saturación de los portadores.

Se define el rendimiento óptico η_{opt} como la relación entre la potencia óptica incidente (P_0) y la potencia absorbida por el material fotoconductor (P_{abs}) y que crea pares de electrón-hueco: $\eta_{opt} = \frac{P_{abs}}{P_0}$.

Además, admitiendo para simplificar que el campo eléctrico es constante entre los electrodos, tenemos: $V_m = E_{0sat} \times d$

10 donde:

- d es el espacio entre electrodos,
- E_{0sat} es el campo eléctrico de saturación de la velocidad de los portadores.

15 Una anchura de banda que alcanza el THz se obtiene utilizando un fotoconductor cuyos portadores fotogenerados presentan tiempos de vida inferiores a un picosegundo, tal como el GaAs crecido epitaxialmente a baja temperatura, y limitando la capacidad eléctrica de la barra de electrodos a unos femtofaradios (fF). Adicionalmente, las dimensiones del fotodetector deben ser inferiores a la decena de micrómetros con el fin de limitar los fenómenos de interferencia entre las corrientes generadas por los diferentes elementos superficiales de la capa activa. Al ser la impedancia de las antenas generalmente del orden de 50 a 100 ohmios, la constante $R_A C$ también es inferior a un picosegundo. Más exactamente, el fotodetector planar de la figura 1 tiene las siguientes características:

- 20
- $200 \text{ fs} < \tau < 1 \text{ ps} \Rightarrow 160 \text{ GHz} < f_{c1} < 800 \text{ GHz}$
 - $0,5 \text{ fF} < C < 3 \text{ fF}$, $R_A \approx 50 \text{ Ohms}$ $25 \text{ fs} < R_A C < 150 \text{ fs}$
 - $6000 \text{ GHz} > f_{c2} > 1000 \text{ GHz}$
 - $d \approx 2 \mu\text{m}$
 - $\mathfrak{R}_m \approx 0,01 - 0,04 \text{ A/W}$ y $\eta_{opt} \approx 1$ con una capa antirreflectante
- 25
- $P_0 \approx 100 \text{ mW}$ antes de la destrucción térmica, $I_0 \approx 1 \text{ a } 2 \text{ mA}$ y $V_m \approx 20 \text{ V}$;

Para $f = 1 \text{ THz}$, tenemos una potencia generada $P_{THz} \approx 1 \mu\text{W}$.

Por lo tanto, se puede definir un rendimiento de conversión η_g que es la relación entre la potencia THz emitida y la suma de las potencias eléctricas y ópticas suministradas:

$$\eta_g = \frac{P_{THz}}{I_0 \times V_m + P_0}$$

30 Para los fotoconductores de la técnica anterior $\eta_g \approx 0,001 \%$.

La destrucción térmica del componente se produce en correspondencia con una elevación de temperatura ΔT_m respecto a la temperatura ambiente, alcanzada para una potencia absorbida P_{absm} . A tenor de las ecuaciones de la térmica, en régimen estacionario:

$$\Delta T_m = P_{th} \times R_{th}$$

35
$$\Delta T_m = R_{th} (P_{absm} + I_{0m} \times V_m)$$

$$\Delta T_m = R_{th} \times I_{0m} \left(\frac{1}{\mathfrak{R}_m} + V_m \right)$$

donde R_{th} es la resistencia térmica que une el fotoconductor a la masa térmica que permanece a temperatura

ambiente (la parte posterior del sustrato), en tanto que P_{th} es la potencia térmica disipada en el fotoconductor, suma de la potencia absorbida en el fotodetector (P_{abs}) y de la potencia joule $P_{joule} = I_0 \times V_m$. De donde se deduce la fotocorriente máxima I_{0m} :

$$I_{0m} = \frac{\Delta T_m}{R_{th} \left(\frac{1}{\mathfrak{R}_m} + V_m \right)}$$

- 5 Si se conservan constantes las frecuencias de corte: $P_{THz} \propto I_0^2$.

Por otra parte, a material constante, ΔT_m es constante, luego:

$$P_{THzm} \propto \frac{1}{\left[R_{th} \left(\frac{1}{\mathfrak{R}_m} + V_m \right) \right]^2}$$

Por lo tanto, para sobrepasar el μW al THz, es imprescindible optimizar:

- 10 1: La relación entre la potencia THz emitida y la potencia térmica generada en el fotodetector. Esto equivale, admitiendo que η_{opt} es constante, a optimizar el rendimiento de conversión η_g . En efecto, basta con sustituir P_0 por P_{abs} para pasar de uno a otro.

Por lo tanto, hay que aumentar \mathfrak{R}_m y disminuir V_m .

2: La evacuación de la potencia térmica con el fin de limitar la elevación de la temperatura del fotodetector. Lo cual equivale a disminuir la resistencia térmica R_{th} , entre el fotodetector y su entorno.

- 15 Los presentes inventores han demostrado que, para un material fotoconductor dado:

$$\mathfrak{R}_m \propto \frac{1}{d}$$

$$V_m \propto d$$

donde d es la distancia entre electrodos. La demostración se presentará más adelante con referencia al fotodetector de la invención, pero el resultado es igualmente de aplicación en un fotodetector de la técnica anterior.

- 20 En el caso de un fotodetector planar presentado en las figuras 1 y 2, la distancia entre electrodos d y el espesor e de la capa activa CE dependen de la longitud de absorción (L_a) en el material fotoconductor (GaAs BT) que es de aproximadamente $0,7 \mu m$ (a $1/e$, siendo "e", en el presente caso, la base de los logaritmos naturales) para una longitud de onda $\lambda = 0,8 \mu m$.

- 25 De este modo $e \sim 2 \mu m$ al menos es necesario para optimizar el rendimiento óptico η_{opt} pero también, y sobre todo, para limitar la absorción en el sustrato de epitaxia SS de GaAs semiaislante. En este, los portadores tienen un tiempo de vida superior en un factor 100 a 1000 respecto al tiempo de vida en el GaAs BT. Por lo tanto, incluso una pequeña parte de la potencia óptica incidente que llegara hasta el sustrato podría generar en él una elevada densidad de portadores y una densidad de corriente no modulada bajo polarización que sería destructiva.

- 30 La condición $d \sim 2 \mu m$ al menos es necesaria para tener un campo eléctrico estático uniforme en la zona de absorción. En efecto, la aplicación de una diferencia de potencial entre dos electrodos conductores depositados sobre la superficie de un semiconductor considerado un dieléctrico produce un campo eléctrico estático nada desdeñable en una profundidad prácticamente igual al espacio entre electrodos (ver las líneas de fuerza del campo eléctrico \vec{E} ilustradas en la figura 2). De este modo, para tener un campo eléctrico no desdeñable en una profundidad e de $2 \mu m$, el espacio entre electrodos d tiene que ser cercano a este valor.

- 35 Puede verse que la estructura de un fotodetector convencional no permite reducir la distancia entre electrodos d por debajo de un cierto valor ($2 \mu m$ en el ejemplo en cuestión) y, por lo tanto, aumentar \mathfrak{R}_m y/o disminuir V_m .

Desde un punto de vista térmico, la resistencia térmica total R_{th} puede verse como la suma de dos resistencias térmicas en serie ($R_{th1} + R_{th2}$), con R_{th1} , la contribución de la capa activa fotoconductor, y R_{th2} , la contribución del sustrato. La contribución R_{th1} depende del espesor e de la capa activa CE; esta contribución es considerable porque

el GaAs BT tiene una escasa conductividad térmica (20 W/m/K). Una vez más, el hecho de no poder reducir la misma por debajo de un cierto valor (2 μm en el ejemplo en cuestión) limita las posibilidades de incrementar la potencia de terahercios generada por un fotodetector de la técnica anterior.

5 El fotodetector según la invención, cuya estructura se ilustra en la figura 3, permite reducir el espacio entre electrodos d y el espesor e de la capa activa, optimizando así los valores de \mathfrak{R}_m , V_m y R_{th} y, consecuentemente, la potencia de terahercios que puede ser generada por fotomezclado.

10 En esta estructura, la capa activa CE de GaAs BT o de otro material fotoconductor adaptado se halla dispuesta de forma intercalada entre dos capas metálicas (ES y EI) que tienen pocas pérdidas en el infrarrojo, tal como el oro, la plata o también el cobre. Estas dos capas, en efecto, cumplen una doble misión. Cumplen una misión de orden eléctrico, puesto que sirven de electrodos de polarización del fotoconductor, pero también de orden óptico, puesto que forman una cavidad óptica resonante. El electrodo inferior EI desempeña la función de espejo metálico, en tanto que la capa ES es semitransparente, merced a su escaso espesor, y permite modular la transmisión de la potencia óptica en la cavidad. El espesor de la capa e y la distancia entre electrodos d coinciden en el presente caso y se pueden seleccionar tales que $e = d < L\alpha$. En efecto, es posible, por absorción resonante, tener un rendimiento óptico cercano a la unidad, pese a un escaso espesor. Puede añadirse en la superficie una capa dieléctrica CP transparente en el infrarrojo que permite pasivar el componente y/o ajustar las propiedades ópticas de la cavidad resonante (recubrimiento antirreflectante o, por el contrario, reflectante). Esta capa puede ser, por ejemplo, nitruro de silicio (Si_xN_y), pero también óxido de silicio (Si_xO_y).

20 El electrodo superior ES podría incluso ser perfectamente transparente: en tal caso, sería la interfase electrodo/aire o capa CP/aire la que haría posible la reflexión parcial de la radiación infrarroja que permita la resonancia óptica.

25 Esta estructura permite asimismo transferir la capa epitaxial de GaAs BT sobre otro sustrato SS' por termocompresión Au-Au o por soldadura de aleación con el concurso de un eutéctico Au-In o Au-Sn. Por lo tanto, el electrodo metálico enterrado puede servir también de capa de "pegado" entre la capa epitaxial y un sustrato huésped seleccionado por sus propiedades térmicas. Ventajosamente, el sustrato SS' se puede seleccionar por tener una conductividad térmica más elevada que el GaAs utilizado en el dispositivo de la figura 1 (conductividad térmica del GaAs: 45 W/m/K).

30 Para realizar tal estructura, se parte de un sustrato de GaAs, sobre el cual se deposita por epitaxia una capa de GaInP y seguidamente una capa de GaAs BT. A continuación, se metaliza esta última capa mediante una deposición de oro, así como el sustrato huésped SS' (Si, SiC...) sobre el que se transferirá el detector. Luego se ponen en contacto las dos caras metalizadas y se aplica una presión de unas decenas de bares (típicamente del orden de 20 bares) a una temperatura comprendida entre 200 y 340 °C durante aproximadamente unas horas – típicamente 1 a 2 horas (termocompresión)–, lo cual conduce a una solidarización de los dos sustratos. En este punto, se graba el sustrato de GaAs en una solución química (por ejemplo, una mezcla de H_2O_2 y H_2SO_4) que se detiene sobre la capa de GaInP. Esta última se graba a su vez en una segunda solución química (por ejemplo, una solución de HCl) que no ataca el GaAs BT. Se obtiene, por tanto, una capa de GaAs BT transferida sobre el sustrato huésped por mediación de una capa de Au. A continuación, sólo resta depositar las capas constitutivas del electrodo superior semitransparente o transparente así como el ocasional recubrimiento dieléctrico.

40 Ventajosamente, la conductividad térmica del material constitutivo del sustrato SS' puede ser superior a 100 W/m/K. Este material puede ser, por ejemplo, el Si (130 W/m/K), el SiC (6H) (490 W/m/K) o, idóneamente, el diamante (1100 W/m/K).

El sustrato SS' carece de influencia de orden óptico, puesto que el electrodo inferior EI se selecciona de manera que sea totalmente reflectante. Este sustrato carece de influencia de orden eléctrico, puesto que el electrodo inferior EI constituye asimismo un apantallamiento electromagnético.

45 Otra ventaja de la estructura de la figura 3 está en que la absorción de la radiación infrarroja se lleva a cabo de manera prácticamente homogénea en todo el espesor de la capa activa CE, cosa que no ocurre en la estructura planar de la técnica anterior. Ahora bien, es posible mostrar (lo cual se hace más adelante) que una absorción homogénea en todo el espesor de la capa es muy ventajosa desde el punto de vista térmico.

A título de ejemplo, el fotodetector de la figura 3 incluye:

- un sustrato espeso SS' de Si, SiC o diamante;
- 50 - un electrodo inferior EI de oro (Au) de espesor superior a 150 nm, por ejemplo 700 nm;
- una capa CE de GaAs BT de espesor e inferior al micrómetro (el asunto del espesor de esta capa se estudiará con mayor detalle en lo sucesivo);
- un electrodo superior ES de oro de 10 nm de espesor; y
- una capa pasivante CP de SiN.

Dentro de una estructura de este tipo, la distancia d entre los electrodos EI y ES es necesariamente igual a e .

Este detector, de tipo por fotoconducción, fue objeto de una modelización óptica, térmica y eléctrica, así como de un estudio experimental para determinar sus prestaciones.

- 5 La modelización óptica se efectuó con respecto al caso de una incidencia normal de la radiación óptica (infrarroja) sobre el detector, lo cual permite no considerar más que una sola componente de los campos E y H. Adicionalmente, se consideró el problema unidimensional (las magnitudes físicas que dependen tan solo de la profundidad z).

El fotodetector superficial S, equiparado con un apilamiento de capas delgadas $C_1, \dots, C_i, \dots, C_N$, caracterizadas por su espesor $t_1, \dots, t_i, \dots, t_N$, y por sus índices de refracción complejos (véase la figura 10) se ilumina uniformemente mediante un haz de potencia P_0 . La densidad de potencia incidente $\mathfrak{S}_0 = P_0/S$.

- 10 La modelización se basa en el método de las matrices de transferencia, bien conocido en óptica. En este planteamiento, se relacionan los campos eléctricos (\vec{E}) y magnéticos (\vec{H}) a ambos lados de cada capa de la estructura mediante una matriz 2x2. Debido a la continuidad de las componentes tangenciales de los campos, las características de la estructura en su conjunto se obtienen a continuación mediante la multiplicación de las matrices correspondientes a cada capa. De este modo, para una capa de espesor d , de índice complejo $n_c = n - jk$ (para una longitud de onda λ) y de impedancia de onda $Z = \frac{Z_0}{n - jk}$ con $Z_0 = 377 \Omega$ la impedancia del vacío, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} E_i \\ H_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda}(n - jk)\right) & \frac{j}{Z} \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda}(n - jk)\right) \\ jZ \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda}(n - jk)\right) & \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda}(n - jk)\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i-1} \\ H_{i-1} \end{bmatrix}$$

- 20 Mediante este método, para una densidad de potencia óptica incidente dada \mathfrak{S}_0 (W/m^2), se calculan las magnitudes escalares complejas E y H en cada interfase, pero también permanentemente dentro de la estructura. Lo cual permite entonces tener la densidad de potencia óptica $\mathfrak{S}(z)$ que se propaga dentro de la estructura según el teorema de Poynting:

$$\mathfrak{S}(z)\vec{z} = \frac{1}{2} \text{Re}(E\vec{x} \times H^* \vec{y})$$

$$\mathfrak{S}(z)\vec{z} = \frac{1}{2} \text{Re}(EH^*)$$

donde “*” representa el operador de conjugación complejo.

La densidad de potencia absorbida $\Pi_{abs}(z) dz$ en una franja de espesor dz situada en z es igual a:

$$\begin{aligned} \Pi_{abs}(z)dz &= -\mathfrak{S}(z + dz) + \mathfrak{S}(z) \\ 25 \Rightarrow \Pi_{abs}(z) &= -\frac{\mathfrak{S}(z + dz) - \mathfrak{S}(z)}{dz} \\ \Rightarrow \lim_{dz \rightarrow 0} \Pi_{abs}(z) &= -\frac{d\mathfrak{S}(z)}{dz} \end{aligned}$$

$\Pi_{abs}(z)$ es la densidad (volumétrica) de potencia absorbida en cada punto de la estructura y se expresa en W/m^3 . Basta entonces con integrar $\Pi_{abs}(z)$ sobre la capa C_i para tener la potencia absorbida en esta capa.

- 30 La figura 4 muestra el rendimiento óptico η_{opt} del detector de la figura 3 calculado por el método de las matrices de transferencia en función de e . Puede verse que el trazado η_{opt} se materializa en una pluralidad de picos de resonancia, lo cual se comprende al apreciar que la estructura de la figura 3 constituye, desde el punto de vista óptico, un patrón de Fabry-Perot. Sea e_0 el espesor que corresponde a la resonancia de orden cero; entonces, el pico de resonancia de orden i corresponde a un espesor $e_i = e_0 + i \cdot \lambda/2n$, siendo n la parte real del índice de refracción de la capa activa CE. En el ejemplo de la figura 4, $e_0 = 47 \text{ nm}$, $\lambda/2n \approx 105 \text{ nm}$ y, por tanto, e_1, e_2, e_3, \dots son respectivamente iguales a 152 nm, 257 nm, 362 nm, etc. Puede verse en la figura 4 que la absorción en el

fotodetector es superior al 70 % de la potencia óptica incidente para $e_{152} \leq 7$.

De este modo, comparado con la estructura planar en la que $e = 2000$ nm, se obtiene para $e_1 = 152$ nm una mejora en un factor $2000/152 \approx 13$ para \mathfrak{R}_m y V_m mientras que se da una degradación de η_{opt} en un factor $0,7/1 = 0,7$ con respecto a esta misma estructura planar al considerar que esta última tiene un rendimiento óptico máximo ($\eta_{opt} = 1$).

- 5 Para la aplicación en la generación de radiación de terahercios, es necesario que la anchura espectral de las resonancias sea suficientemente amplia para permitir el fotomezclado de dos longitudes de onda ópticas diferentes. De este modo, se requiere que la anchura a media altura de los picos de resonancia sea como mínimo igual a 100 GHz, y preferentemente al menos igual a 1 THz. Esta condición se cumple muy sobradamente en el ejemplo de la figura 4, donde la absorción tan solo varía del 1 al 2 % cuando se pasa de $\lambda = 0,77 \mu\text{m}$ a $0,79 \mu\text{m}$, lo cual
- 10 corresponde a una diferencia de frecuencia $f \approx 10$ THz.

- Para calcular la resistencia térmica, se ha modelizado el fotodetector, supuesto cilíndrico de superficie S , radio r y altura sensiblemente igual a e , mediante una fuente de calor de potencia térmica P_{th} , unida a una masa térmica mediante una resistencia térmica $R_{th} = R_{th1} + R_{th2}$ (véase la figura 11). La elevación de temperatura $\Delta T = T_f - T_0 = R_{th} \times P_{th}$ puede verse como la suma de dos elevaciones $\Delta T_1 = R_{th1} \times P_{th}$ y $\Delta T_2 = R_{th2} \times P_{th}$, que
- 15 corresponden respectivamente al cruce de la capa CE de GaAs BT y a la "dispersión" en el sustrato SS'.

Generalmente $r \gg e$, se puede considerar, por lo tanto, en primera aproximación, que la temperatura T tan solo depende de la profundidad z . Por lo tanto, R_{th1} se puede calcular resolviendo la ecuación de la térmica con una dimensión:

$$k_{GaAsBT} \frac{d^2 T}{dz^2} = \rho_{th}(z)$$

- 20 Con k_{GaAsBT} la conductividad térmica del GaAs BT y ρ_{th} , la densidad de potencia en el fotodetector, tal que:

$$S \times \int_0^e \rho_{th}(z) dz = P_{th}$$

En primera aproximación, es posible considerar que la potencia térmica es generada únicamente en la superficie del fotodetector y, por tanto, ρ_{th} es nula para $z \neq 0$. Entonces, R_{th1} es igual a:

$$R_{th1} = \frac{e}{k_{GaAsBT} \times S}$$

- 25 No obstante, resulta claro que la resistencia térmica puede disminuir si la potencia térmica es generada en el conjunto de la capa de GaAs BT.

Así, si $\rho_{th}(z) = cste = \frac{P_{th}}{S \times e}$, entonces $R_{th1} = \frac{1}{2} \frac{e}{k_{GaAsBT} \times S}$.

Para tener en cuenta este fenómeno, se puede calcular la densidad de potencia óptica absorbida en función de z , $\Pi_{abs}(z)$ (véase más arriba), así como la densidad de potencia joule (véase más abajo):

30 $\Pi_{joule} = q \times (n_e + n_h) \times v_s \times E_0 = \Pi_{abs}(z) \times 2 \times q \times \tau \times \frac{1}{h\nu}$

Por lo que

$$\rho_{th}(z) = \Pi_{joule}(z) + \Pi_{abs}(z) = \Pi_{abs}(z) \times \left(1 + 2 \times q \times \tau \times \frac{1}{h\nu}\right)$$

Una vez calculado ΔT_1 , se calcula R_{th1} integrando ρ_{th} en todo el volumen del fotodetector:

$$R_{th1} = \frac{\Delta T_1}{\iiint \rho_{th} dV}$$

- 35 Al ser muy pequeñas las dimensiones del fotodetector ($\sim \mu\text{m}$) frente a las del sustrato ($\sim \text{mm}$), la contribución R_{th2} se puede modelizar mediante una resistencia llamada "de dispersión" ("spreading resistance") de una fuente puntual en

un espacio semiinfinito. Para un fotodetector circular de radio r , el problema posee una simetría cilíndrica y, entonces, R_{th2} es igual a:

$$R_{th2} = \frac{1}{\pi r k_{sustrato}}$$

5 La figura 5 muestra el valor calculado de la resistencia térmica total para el fotodetector vertical resonante de la figura 3 con diferentes materiales de sustrato y en función del espesor de la capa activa CE, para una capacidad electrostática C constante de 3,2 fF correspondiente a una frecuencia de corte $fc_2 = 1$ THz para $R_A = 50 \Omega$. De este modo, la curva R_{th1} representa la única contribución de la capa activa CE en la resistencia térmica; las curvas R_{th-Si} , R_{th-SiC} y R_{th-D} representan la resistencia térmica total para un fotodetector que presenta un sustrato espeso de Si, SiC y diamante, respectivamente. El punto $R_{th-GaAs}$ se refiere a un detector de estructura planar (véanse las figuras 1 y 2) con un sustrato de GaAs semiaislante y un espesor $d = 2,2 \mu m$.

En primera aproximación, en la estructura vertical de la invención, R_{th1} es inversamente proporcional a la capacidad electrostática C :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r GaAs S}{d} \text{ y } R_{th1} \approx \frac{d}{k_{GaAsBT} S}$$

de ahí que $R_{th1} C \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon_r GaAs}{k_{GaAsBT}}$

15 con

- ϵ_{rGaAs} , la permitividad dieléctrica relativa del GaAs BT,
- ϵ_0 , la permitividad dieléctrica del vacío,
- S , la superficie del fotodetector vertical resonante, y
- k_{GaAsBT} , la conductividad térmica del GaAs BT.

20 Por consiguiente, para C constante, R_{th1} no debería depender de e . Sin embargo, puede verse en la figura 5 que R_{th1} no es del todo constante, pues, tal como se ha explicado antes, desde un punto de vista térmico, es preferible absorber la potencia óptica homogéneamente en la capa. De este modo, R_{th1} pasa de 1100 K/W para $d = 2200$ nm a ≈ 700 K/W para $d = 150$ nm. Por otra parte, puede verse que es posible disminuir R_{th} en un factor 4 con respecto a la estructura planar con SiC o diamante y también en un factor 2 sobre Si.

25 Una modelización eléctrica, ilustrada mediante la figura 9, permite el cálculo de coeficiente de respuesta (\mathfrak{R}) del fotodetector vertical de la figura 3. Para calcular el coeficiente de respuesta \mathfrak{R} hay que resolver las ecuaciones de deriva-difusión y de continuidad en el semiconductor bajo iluminación. En el presente caso, cuando $d \ll 2r$, se puede reducir a un problema unidimensional en el que las magnitudes físicas, tales como n_e (n_h), la densidad de electrones (huecos) o \mathfrak{P} la densidad de potencia óptica tan solo dependen de la profundidad z .

30 Por otra parte, se desprecia el efecto de la densidad de carga $q \times (n_h - n_e)$ (con $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C) sobre el campo eléctrico estático, por lo que este último es constante en la estructura:

$$E_0 = \frac{V}{d}$$

35 Además, el GaAs BT es un material con un tiempo de vida de los portadores (τ) inferior al picosegundo y de escasa movilidad ($\mu \approx 400$ cm²/V/s), por lo que la longitud de difusión L_D es muy corta. En efecto, $L_D = (D \times \tau)^{0,5}$ con $D = \mu \times kT/q \approx 10$ cm²/V/s el coeficiente de difusión y $\tau \approx 1$ ps, de ahí que $L_D \approx 30$ nm. Al ser despreciable esta longitud frente a la longitud de absorción, la longitud de onda óptica y las dimensiones del fotodetector, se pueden despreciar, por tanto, los procesos de difusión. Por lo tanto, las densidades de portadores son directamente proporcionales al índice de generación óptica:

$$n_e(z) = n_h(z) = \Pi_{abs}(z) \times \tau \times \frac{1}{h\nu}$$

40 con $h\nu$: la energía fotónica $h\nu = 1,59$ eV para $\lambda = 0,78 \mu m$ y $\Pi_{abs}(z)$ es la densidad de potencia absorbida.

Asumiendo que los electrones y los huecos tienen una velocidad de saturación v_s idéntica, la corriente de deriva $I(z)$ dentro del componente a la profundidad z es igual a

$$I(z) = q[n_e(z) + n_h(z)] \times v_s \times S$$

$$I(z) = -2 \frac{q}{h\nu} \Pi_{abs}(z) \times v_s \times S \times \tau$$

En este punto, siguiendo el razonamiento de Feiginov (Michael N. Feiginov "Analysis of limitations of terahertz p-i-n uni-traveling-carrier photodiodes", J. Appl. Phys. 102, 084510 (2007)), se puede inferir la corriente I_{ext} , que es el promedio de la corriente de deriva en la estructura.

$$5 \quad I_{ext} = \frac{1}{d} \int_0^d I(z) dz$$

de ahí que

$$I_{ext} = -\frac{2}{d} \int_0^d \frac{q}{h\nu} \Pi_{abs}(z) \times v_s \times S \times \tau \times dz$$

$$\Rightarrow I_{ext} = \frac{2}{d} \times \frac{q}{h\nu} \times P_{abs} \times v_s \times \tau$$

$$\Rightarrow \mathfrak{R}_m = \frac{I_{ext}}{P_{abs}} = \frac{A}{d}$$

$$\text{Con } A = 2 \times \frac{q}{h\nu} \times v_s \times \tau \quad \text{y } P_{abs} = \int_0^d \frac{q}{h\nu} \Pi_{abs}(z) dz$$

10 Nos encontramos con el resultado, antes expuesto, según el cual el coeficiente de respuesta \mathfrak{R} es inversamente proporcional a la distancia entre electrodos d .

Tomando para el GaAs BT: $v_s = 0,7 \cdot 10^7$ cm/s y $\tau = 800$ fs se obtiene $A = 70 \times 10^{-9}$ Am/W.

Con objeto de evaluar la ganancia en términos de potencia THz generada, podemos situarnos inmediatamente antes de la destrucción del componente y retomar la expresión de la fotocorriente máxima I_{0m} :

$$I_{0m} = \frac{\Delta T_m}{R_{th} \left(\frac{1}{\mathfrak{R}_m} + E_{0sat} \times d \right)}$$

15 Puesto que $\mathfrak{R}_m = \frac{A}{d}$, se puede escribir $I_{0m} = \frac{\Delta T_m}{R_{th} \times d \times \left(\frac{1}{A} + E_{0sat} \right)}$.

A material fotoconductor constante ΔT_m , E_{0sat} y A son constantes. Por lo tanto, si denominamos I_{0mP} la corriente máxima para una estructura planar (según la técnica anterior) de espesor $d_P = 2000$ nm y I_{0mV} la propia para una estructura vertical (según la invención) de espesor $d_V = 150$ nm, hallamos una relación de las resistencias térmicas

$$\frac{R_{thP}}{R_{thV}} = 4 \Rightarrow \frac{I_{0mV}}{I_{0mP}} = \frac{R_{thP} \times d_P}{R_{thV} \times d_V} = 53.$$

20 Siendo la potencia THz generada proporcional al cuadrado de la fotocorriente, la invención permite, al menos en principio, un aumento en un factor $53^2 \approx 2800$ de la potencia generada a 1 THz.

Estos resultados fueron validados experimentalmente midiendo de manera continua la respuesta de un fotodetector vertical en función de la distancia entre electrodos d sobre una misma capa de GaAs BT caracterizada por un tiempo de vida τ de portadores fotogenerados de aproximadamente 800 fs. Esta variación de espesor se realizó sobre una misma muestra llevando a cabo un grabado en "bisel" de una capa CEB de GaAs BT de 2,2 μm de espesor transferida sobre un sustrato SS'. Así, se obtuvieron espesores de entre $e_{min} = 0,3 \mu\text{m}$ y $e_{max} = 2,2 \mu\text{m}$. En la figura 6 se ilustra la estructura ensayada. Los electrodos metálicos superior ES e inferior EI son de oro y permiten polarizar la capa de GaAs BT.

30 La figura 7 muestra el coeficiente de respuesta \mathfrak{R} medido en función de d para una tensión de polarización correspondiente a un campo electrostático $E_0 = 50$ KV/cm y una potencia óptica $P_0 = 10$ mW. La respuesta varía prácticamente en $1/d$ (línea continua que representa la función A/d con $A = 7 \cdot 10^{-8}$ Am/W).

Además, la figura 8 muestra que se puede obtener una fotocorriente máxima de 35 mA para una potencia óptica

$P_0 = 190$ mW con una distancia entre electrodos $d = 340$ nm. Este valor es 10 a 20 veces superior a las corrientes obtenidas sobre fotodetectores planares.

Se ha considerado hasta el momento el caso de un fotodetector de tipo de fotorresistencia, pero el alcance de la invención no queda limitado a este tipo de dispositivo. Otros fotodetectores que son adecuados para la puesta en práctica de la invención son, en especial, los fotodiodos de transporte unipolar (llamados "UTC", del inglés "univtravelling carrier"). Se trata de fotodiodos de tipo PiN cuyo comportamiento dinámico no está limitado por los huecos (generalmente más lentos). En este tipo de detector, la absorción se lleva a cabo en la "base" de tipo P y no en la zona intrínseca. Por ejemplo, a $\lambda = 1,55$ μm (es decir, una energía fotónica E_{ph} de 0,8 eV), la base puede ser de InGaAs que presenta una banda prohibida $E_g < E_{ph}$, mientras que la zona intrínseca y la zona N pueden ser de InP de banda prohibida $E_g > E_{ph}$.

La limitación principal de estos diodos, cuando se optimizan para el fotomezclado, es su escasa absorción del flujo luminoso (un tanto por ciento pequeño). En efecto, cuanto más espesa sea la zona absorbente, mayor será el tiempo de difusión de los electrones. Además, una gran parte del flujo de fotones es absorbida por la capa de titanio generalmente utilizada como capa de contacto de la zona P. Por lo tanto, es ventajoso, de conformidad con la invención, poner la zona P dentro de una cavidad óptica determinada por los electrodos superior ES (semitransparente) e inferior EI (totalmente reflectante), tal como se representa en la figura 12, lo cual permite también la transferencia sobre un sustrato que tiene una mayor conductividad térmica.

La invención se podría aplicar asimismo en fotodiodos PiN ordinarios, pero, en general, estos detectores no son lo bastante rápidos para convenir para la generación por fotomezclado de radiación de terahercios.

Los materiales fotoconductores indicados se citan solamente a título de ejemplos no limitativos; un experto en la materia puede identificar otros materiales fotoconductores adaptados para la realización de fotodetectores según la invención.

Un "fotomezclador" es un dispositivo que incluye un fotodetector ultrarrápido PHD acoplado con una antena de terahercios AT. Un fotodetector de estructura vertical se puede acoplar con numerosas antenas conocidas por la técnica anterior. Sin embargo, es preferible asociarlo con una antena de bocina transversal electromagnética, ideada por los presentes inventores y descrita en el documento FR 2908931.

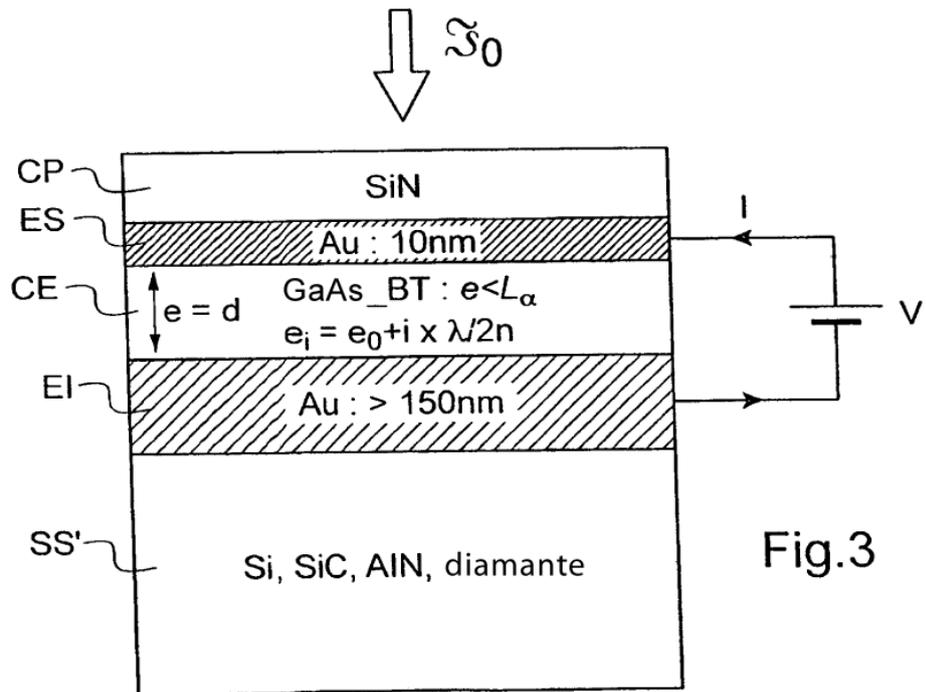
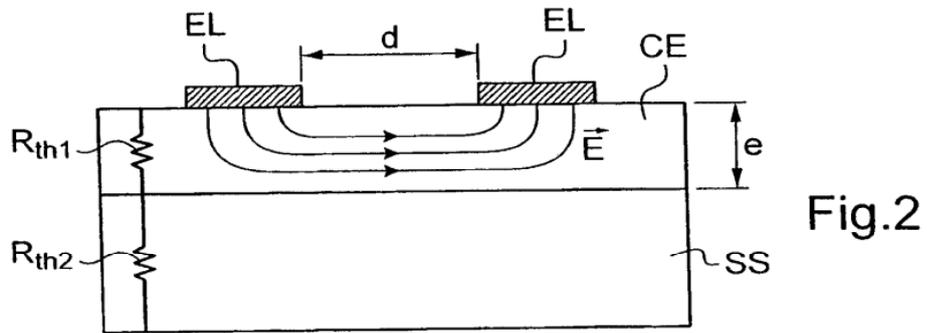
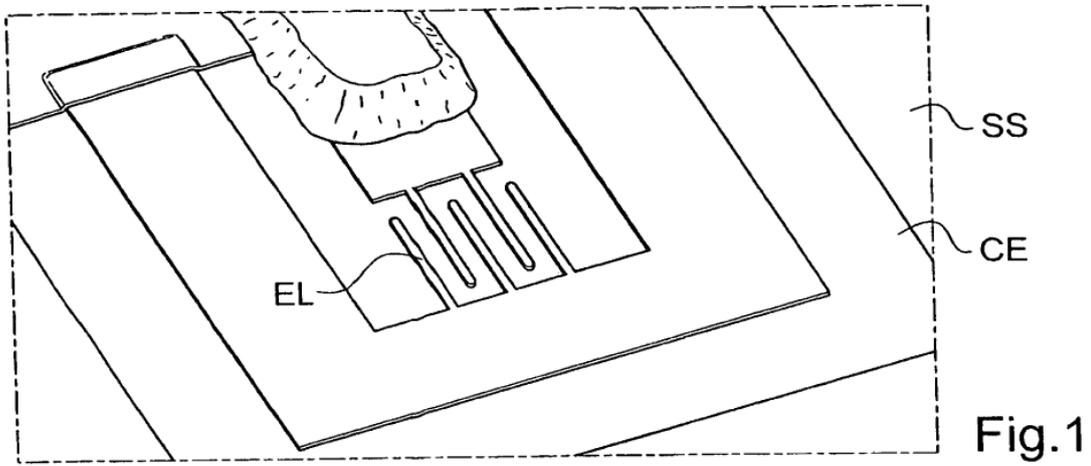
Tal antena AT incluye un plano de masa PM, conformado por una capa metálica depositada sobre un sustrato aislante SS', y una cinta conductora RC que, extendiéndose por encima de dicho plano de masa, forma con este último un ángulo agudo ϕ . Ventajosamente, la cinta RC se ensancha desde su base (próxima al plano de masa) hacia su extremo, lo cual permite mantener constante su impedancia (típicamente 50 Ω). Este tipo de antena es interesante porque presenta una amplia anchura de banda; consecuentemente, es adecuada para la realización de una fuente sintonizable de radiación de terahercios. Adicionalmente, es fácil asociar una antena de bocina transversal electromagnética con un fotodetector de estructura vertical tal y como se ha descrito anteriormente. Esto se ilustra en la figura 13. Una capa espesa de oro PM constituye tanto el electrodo inferior del fotodetector PHD como el plano de masa de la antena. La cinta conductora RC, también de oro, está separada de este plano de masa por un resalto PMI de material aislante (SiO_2 , Si_3N_4 , etc.) de altura h generalmente comprendida entre 100 nm y 10 μm , y está conectada al electrodo superior del fotoconductor mediante un "puente" metálico PC. Esta estructura está "apantallada": no hay ninguna pérdida por radiación en el sustrato.

La figura 14 muestra una representación esquemática de una fuente de radiación de terahercios constituida por un fotomezclador según la figura 13 y dos fuentes de radiación láser L_1 y L_2 . Las frecuencias de emisión de las fuentes L_1 y L_2 están desplazadas 100 GHz - 10 THz en orden a poder originar un batido dentro del margen de terahercios. Puede tratarse de láseres de estado sólido o de semiconductor, ocasionalmente sintonizables, y que emiten preferentemente en el infrarrojo cercano (800 - 1550 nm). Los haces de luz F_1 , F_2 emitidos por estas fuentes láser se superponen sobre el electrodo superior ES del fotodetector PHD para generar el batido de terahercios. Pueden llegar a este por propagación libre en el aire o por propagación guiada en fibra óptica o en guías planares (óptica integrada). Según se ha explicado antes, el batido de las dos radiaciones láser origina en el fotodetector una fotocorriente que incluye una componente de frecuencia de terahercios, que excita una onda electromagnética OT de igual frecuencia en la antena de bocina AT, la cual es emitida por el extremo libre de esta última.

Como variante, es posible utilizar una sola fuente láser oscilante en dos modos longitudinales cuya diferencia de frecuencia es del orden de 100 GHz - 10 THz. Esta forma de realización resulta ser muy ventajosa, especialmente debido al hecho de que los dos haces, correspondientes a los dos modos, están necesariamente superpuestos, y de que su diferencia de frecuencia es más estable que si se utilizaran dos fuentes independientes.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Fotomezclador para la generación de radiación de terahercios que incluye un fotodetector (PHD) acoplado a una antena (AT) para radiación de terahercios, caracterizado por que el fotodetector incluye una capa (CE) de material fotoconductor susceptible de absorber una radiación óptica, presentando dicha capa un espesor (ϵ) inferior a la longitud de absorción de esta radiación por parte del material fotoconductor y estando comprendida entre un electrodo (ES), llamado superior, al menos parcialmente transparente, y un electrodo (EI), llamado inferior, reflectante, conformando dichos electrodos inferior y superior una cavidad resonante para dicha radiación óptica.
- 10 2. Fotomezclador según la reivindicación 1, en el que dicho fotodetector se transfiere, por mediación de dicho electrodo inferior, sobre un sustrato (SS') que presenta una conductividad térmica superior a la del material fotoconductor.
3. Fotomezclador según una de las anteriores reivindicaciones, en el que dicho material fotoconductor está caracterizado por un tiempo de vida de los portadores de carga fotogenerados inferior a 10 ps y preferentemente inferior a 1 ps.
- 15 4. Fotomezclador según la reivindicación 3, en el que dicho material fotoconductor se selecciona de entre el GaAs crecido epitaxialmente a baja temperatura (GaAs BT), el $\text{GaSb}_x\text{As}_{1-x}$ BT ($0 < x < 1$) y el InGaAs irradiado.
5. Fotomezclador según una de las anteriores reivindicaciones, en el que dicho fotodetector es de un tipo seleccionado de entre un detector de fotoconducción y un diodo de transporte unipolar.
6. Fotomezclador según una de las anteriores reivindicaciones, en el que dicha radiación óptica es una radiación infrarroja, que tiene preferentemente una longitud de onda comprendida entre 700 y 1600 nm.
- 20 7. Fotomezclador según una de las anteriores reivindicaciones, en el que dicho resonador óptico presenta picos de resonancia de anchura a media altura superior o igual a 100 GHz y preferentemente superior o igual a 1 THz.
8. Fotomezclador según una de las anteriores reivindicaciones, en el que dichos electrodos superior (ES) e inferior (EI) son electrodos metálicos.
- 25 9. Fotomezclador según una de las anteriores reivindicaciones, que incluye un recubrimiento dieléctrico transparente (CP) por encima de dicho electrodo superior (ES).
10. Fotomezclador según una de las anteriores reivindicaciones, en el que dicha capa de material fotoconductor (CE) presenta un espesor (ϵ) inferior a 1 μm y preferentemente inferior a 500 nm.
- 30 11. Fotomezclador según una de las anteriores reivindicaciones, en el que dicha antena (AT) para radiación de terahercios es del tipo de bocina transversal electromagnética, que incluye un plano de masa (PM) y una cinta conductora (RC) que, extendiéndose por encima de dicho plano de masa, forma con este último un ángulo agudo (φ).
- 35 12. Fotomezclador según la reivindicación 11, en el que dicho fotodetector (PHD) se transfiere sobre un sustrato (SS') dieléctrico o semiconductor intrínseco por mediación de su electrodo inferior (EI); en el que el plano de masa (PM) de la antena está constituido por una prolongación de dicho electrodo, que se extiende por encima de dicho sustrato; y en el que la cinta conductora (RC) que se extiende por encima de dicho plano de masa está conectada eléctricamente a dicho electrodo superior.
- 40 13. Fuente de radiación de terahercios que incluye un fotomezclador según una de las anteriores reivindicaciones y al menos una fuente de radiación láser (L_1 , L_2) establecida para dirigir al electrodo superior del fotodetector dos haces (F_1 , F_2) de radiación láser superpuestos, presentando dichos haces de radiación láser una diferencia de frecuencia comprendida entre 100 GHz y 10 THz.
14. Utilización de un fotomezclador según una de las anteriores reivindicaciones, para la generación de radiación de terahercios por fotomezclado.



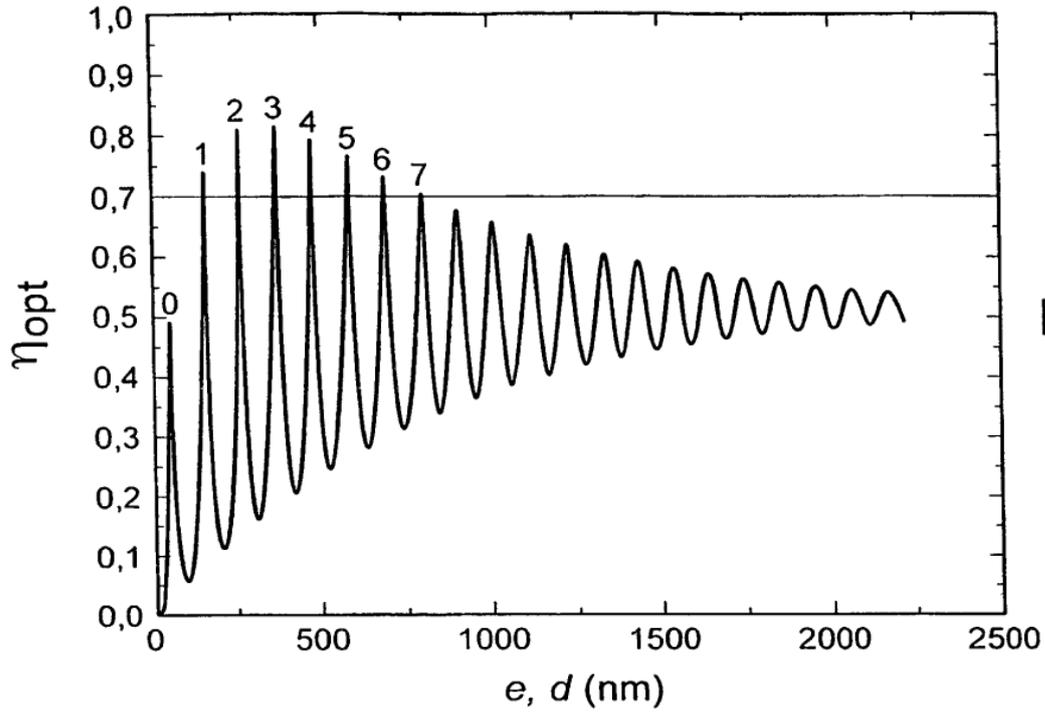


Fig.4

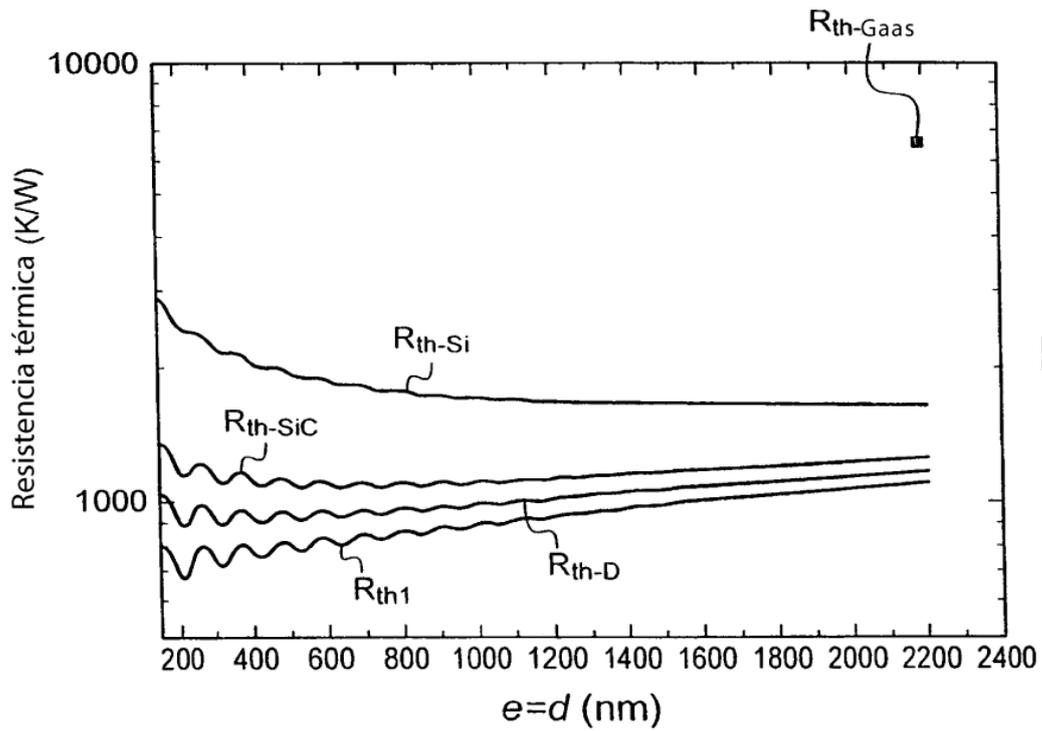


Fig.5

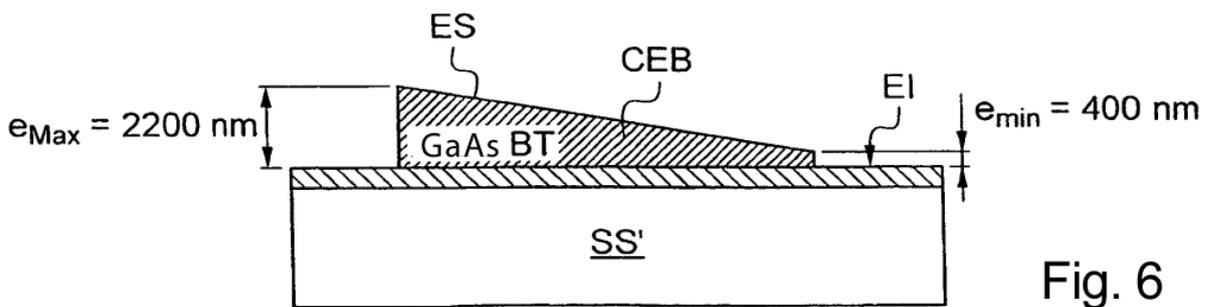


Fig. 6

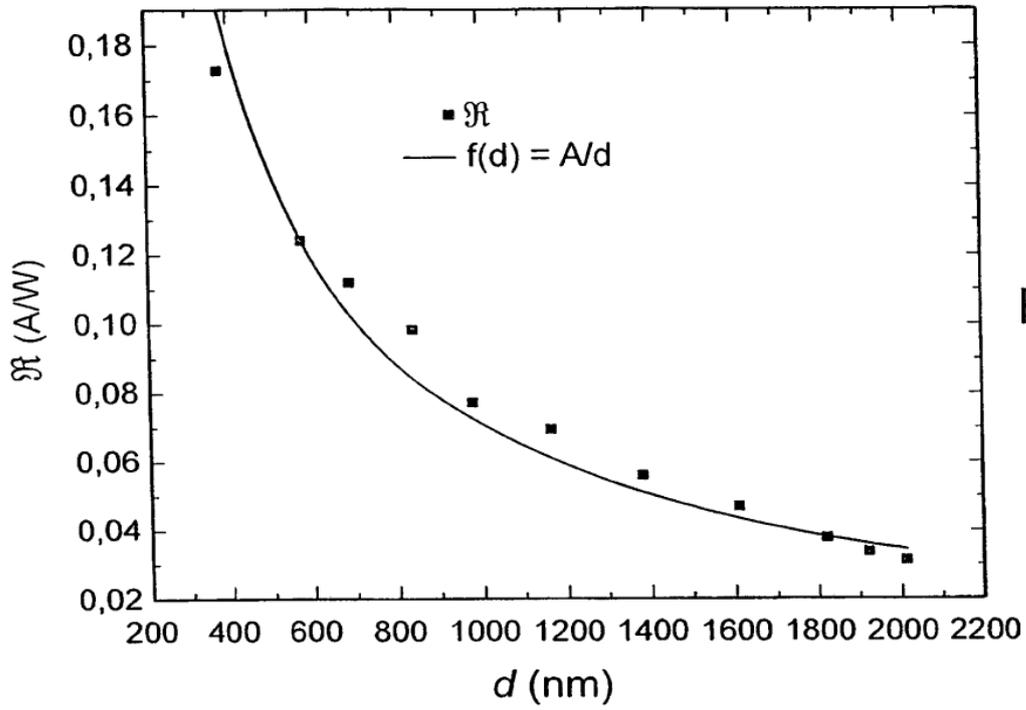


Fig.7

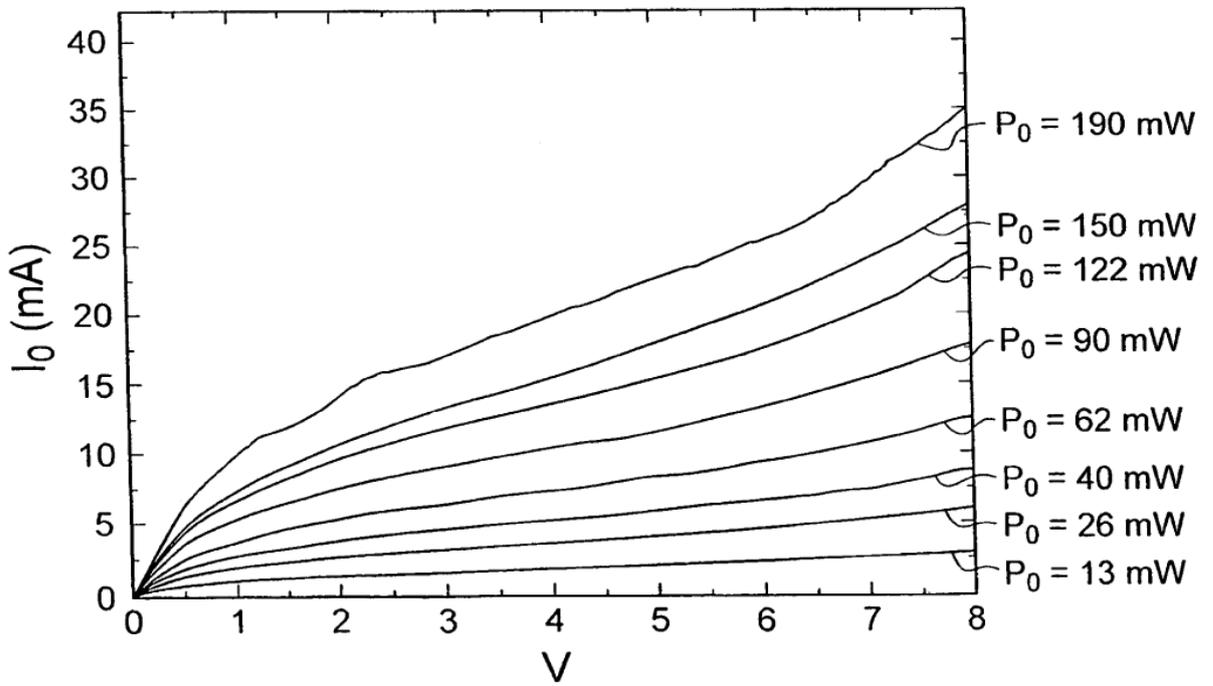


Fig.8

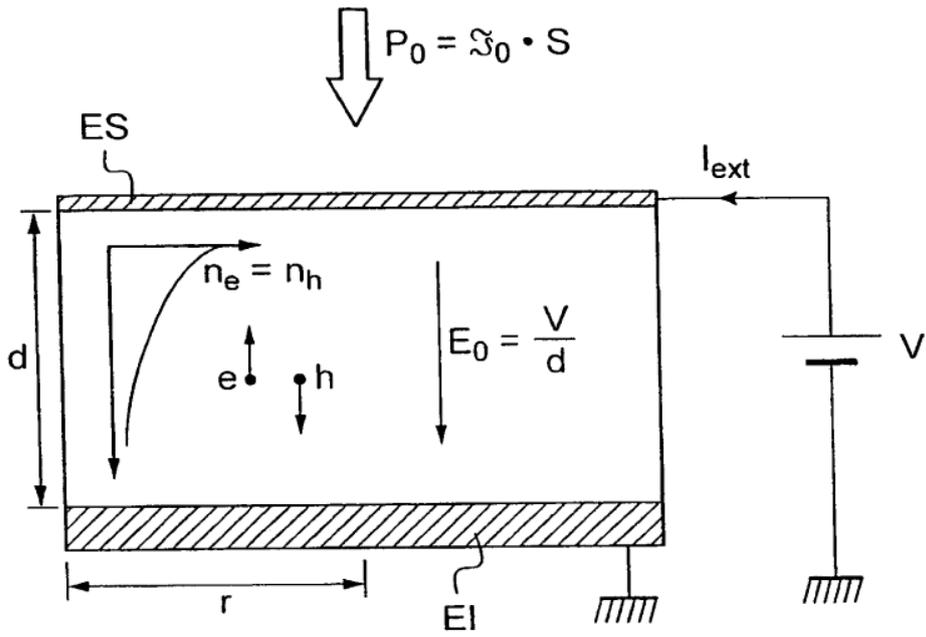


Fig.9

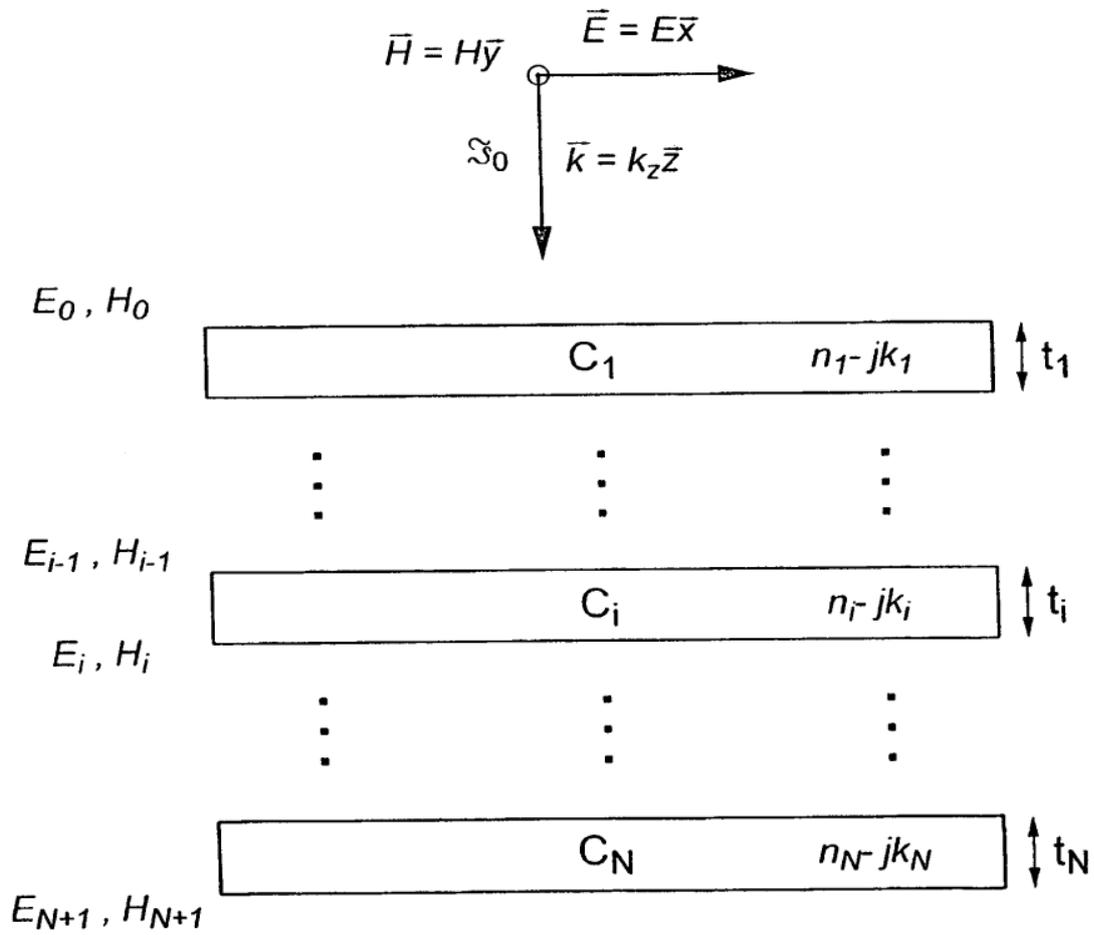


Fig.10

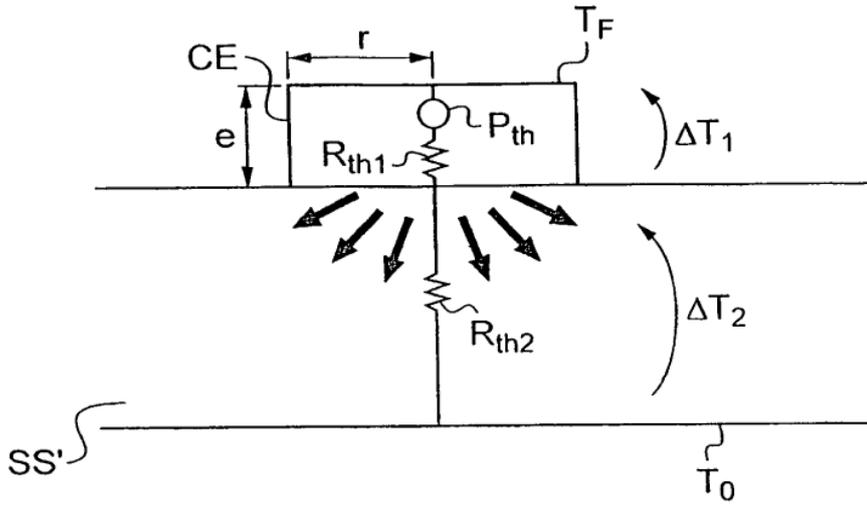


Fig.11

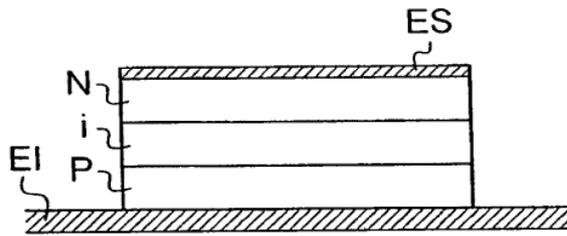


Fig.12

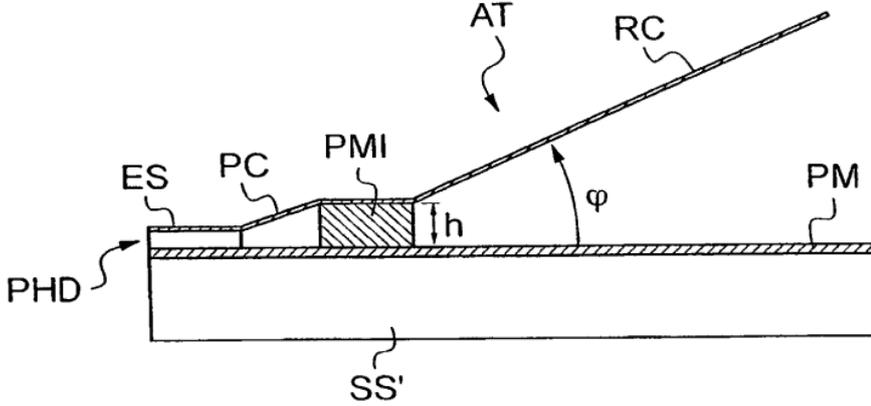


Fig.13

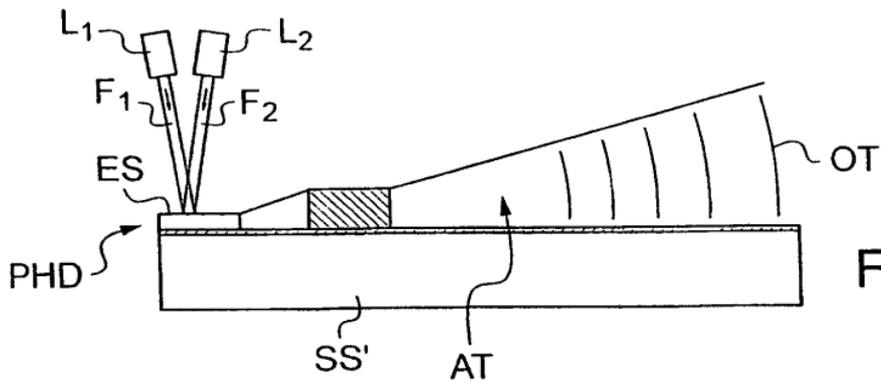


Fig.14